DOI:10.13866/j.azr.2024.03.04

近40 a内蒙古冬旱时空演变特征

陶际峰[1,2]， 包玉龙[1,2]， 郭恩亮[1,3]， 金额尔德木吐[1,2]， 呼斯乐[1,2]， 包玉海[1,2]

（1. 内蒙古师范大学地理科学学院,内蒙古 呼和浩特 010022；2. 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010022；3. 内蒙古自治区蒙古高原灾害与生态安全重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010022）

摘 要：冬季干旱是制约内蒙古冬季畜牧业生产的主要干扰因子之一,定量表征其时空变化特征和发展规律对防灾减灾、保障农牧业健康发展具有重要意义。利用1980—2021年冬季(10月—翌年3月)ERA5-Land再分析气象数据,计算1个月和6个月时间尺度的标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index,SPEI),采用趋势分析、时空热点分析等方法,分析内蒙古全区和五种主要植被类型区冬季干旱演变特征。结果表明:(1)近40 a内蒙古冬季整体SPEI呈现下降趋势,干旱化现象在不同植被和月份中表现不一,也有少数植被和月份趋于湿润化。(2)内蒙古地区冬季干旱的时空热点变化模式主要表现为:振荡的热点、振荡的冷点和未检测到模式。具体从季节和月时间尺度来看,冬旱热点主要集中在内蒙古中部和西部的大部分地区,以及东部的兴安盟和通辽市,即这些区域冬旱现象呈现加剧的趋势。(3)在干旱频率与频数统计方面,轻度冬旱事件发生频率最高,而荒漠草原和隔壁荒漠地区是发生冬旱事件最为频繁和严重的区域。

关键词：内蒙古冬旱；时空演变；SPEI指数；新兴时空热点分析

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)第六次评估报告指出,全球近40 a的变暖速度是过去2000年来前所未有的,随着全球变暖的加剧,气候系统的不稳定性随之增加[1]。人们已经认识到,未来极端天气事件的持续时间、频率和强度将呈上升趋势,对地球系统将会产生广泛且深刻的影响[2]。特别是干旱,作为发生频率最高、持续时间最长、影响范围最广的气象事件之一[3],对国家经济、社会发展和人类活动产生重大影响。

全球气候变化使干旱的季节特征更加明显。不同季节发生的干旱对环境产生了各种不同的影响。特别是冬季干旱,这对许多作物的关键生长期造成了严重影响。冬旱不仅会影响农牧业生产,减少产量,还会导致诸如牲畜体况恶化,母畜流产或死亡等严重问题,进而引起“黑灾”等会造成重大财产损失的灾害现象。所谓“黑灾”是指在我国北方无水草场,冬季雪量减少甚至无雪,导致牲畜缺水、疫病流行等,最终造成大量牲畜死亡的现象[4]。因此,准确理解和描述冬季干旱的特征和演变对于区域防灾减灾具有重要的科学意义。

目前在干旱问题的研究中,通过干旱指数进行干旱事件的刻画得到广泛应用。如标准化降水指数(Standardized Precipitation Index,SPI)[5]、帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index,PDSI)[6]、标准化潜在蒸散发指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index,SPEI)[7]、气象干旱综合指数(Meteorological Drought Composite Index,MCI)[8]、K干旱指数[9]等。在对某一研究区域干旱频率和程度进行评估方面,不同干旱指数适用范围和应用效果不尽相同。SPI指数计算简便且具有多时间尺度等优点,陈正发等[10]基于云南省36个气象站点的降水数据构建了SPI指数,结合空间分析、趋势检验等方法,分别从年和季多时间尺度方面识别云南省多

收稿日期：2023-08-18； **修订日期：**2023-12-01
基金项目：内蒙古自然科学基金面上项目(2021MS04016);内蒙古自治区科技重大专项课题(2021ZD004503);内蒙古自治区哲学社会科学规划项目(2022NDA225);内蒙古自治区重点研发与成果转化计划项目(2022YFSH0070)
作者简介：陶际峰(1997-),男,硕士研究生,主要从事干旱与气候变化研究. E-mail: taojifeng@mails.imnu.edu.cn
通讯作者：包玉龙. E-mail: baoyulong@imnu.edu.cn

尺度气象干旱时空分布及演变特征，发现云南省干旱在年尺度和季节尺度下频率及演变趋势的时空分异特征，即区域干旱以季节性干旱为主，其中春旱、冬旱的干旱频率和等级总体较高。但SPI指数仅考虑了降水对干旱的影响，未考虑其他气象因素如温度或蒸发量，在某些情况下无法全面反映干旱状况，且SPI的准确性依赖于长期、连续且准确的降水记录，这在某些地区难以获得。相比于SPI指数，PDSI指数综合考虑了降水、土壤水分、径流和潜在蒸散等诸多要素，并且在长期尺度上可以有效地判断干旱状况，段莹等[11]利用1951—2011年江淮流域70个测站的观测资料，计算了PDSI并结合降水异常和气象服务信息，综合分析了1951—2011年各季节江淮流域的旱涝情况，发现PDSI指数对干旱的范围、发展及持续性的描述较好但敏感度不够高，且PDSI容易受到不同地区气候差异性的影响，存在监测偏差，特别是在气候显著偏离其最初设计的中纬度大陆常规的地区。虽在PDSI指数的基础上，scPDSI干旱指数虽然进行了自我校正以适应不同地区的气候，但在某些特殊气候区域（如极端干旱或湿润地区），其准确性仍受限[12]。

相比之下，SPEI指数具有SPI指数多时间尺度优势的同时，还纳入对蒸散发对干旱影响的考量，相对于PDSI指数，SPEI适用于全球各种不同气候类型的地区，比PDSI的适应性更广，且能更快地响应短期气候变化，尤其是在反映由温度变化引起的干旱状况方面，被广泛的用于不同地区不同时间尺度下的干旱监测研究，并取得了良好效果[13]。尽管目前学者们利用SPEI指数已是近年来在全球变暖背景下监测干旱特征比较理想且有效的评价工具，但多集中于夏季干旱，其中对冬旱的研究大多立足于对冬小麦生长的影响[14]，而忽视了冬旱在不同时间尺度上和不同植被类型上的变化差异。另一方面，对于干旱事件空间演变特征方面，本文采用新兴时空热点分析方法，通过识别时间和空间上的热点区域，更加强调数据在空间上的关联性和聚集特征[15]，更深入挖掘空间对象所隐含的时空关系及其变化模式，该方法为资源分配、规划决策和风险管理进一步提供有力支持。

内蒙古自治区拥有森林、草甸草原、典型草原、荒漠草原以及戈壁荒漠等五大主要植被类型，是我国最大的牧区基地也是是粮食主产省区之一，其牧区面积占到自治区总面积的70%。内蒙古的优势得天独厚，农牧业生产在我国地位重要、成效显著、意义重大，具有不可替代的作用。由于全球变暖的影响，该地区旱灾发生的频率呈逐年增加之势，给地区经济发展和人类活动带来了深刻的影响。特别是冬旱，已经成为影响该地区畜牧业及生态环境可持续发展的主要灾害之一。因此，开展对内蒙古地区冬旱时空演变特征的分析，不仅对防灾减灾工作提供科学依据，而且对于生态环境的改善与社会经济的发展具有重要的意义。本研究将从多时间尺度、多植被类型区入手，采用SPEI指数量化内蒙古冬季干旱发生的严重程度，借助新兴时空热点分析等方法，深入探究冬季干旱时空演变机制。以期在考虑气候变化、生态保护与可持续发展等多方面综合影响的同时，为内蒙古地区的农牧业生产，政策制定工作提供科学可靠的理论参考依据，以确保该地区农牧业的长期稳定与繁荣。

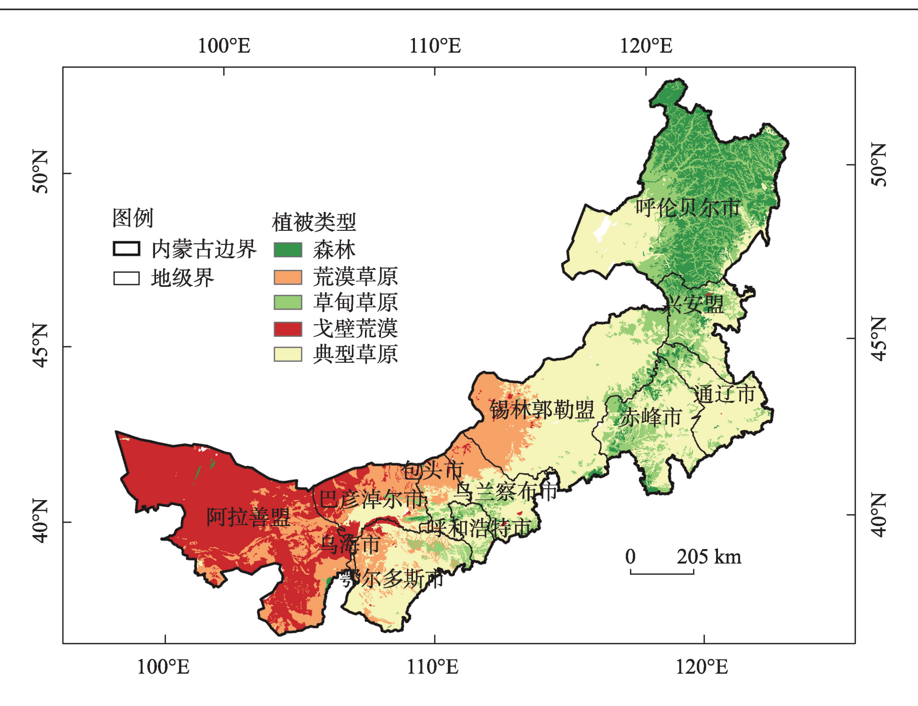
1 数据与方法

1.1 研究区概况

内蒙古自治区位于我国北部边疆（37°24′~53°23′N，97°12′~126°04′E）（图1），是典型的干旱半干旱区。东北部与黑龙江、吉林、辽宁、河北交界，南部与山西、陕西、宁夏相邻，西南部与甘肃毗连，北部与俄罗斯、蒙古接壤，地势由东北向西南斜伸，总面积达1.183×10^6 km²，占我国国土面积的12.3%。平均海拔高度1000 m，气候以温带大陆性季风气候为主。降水少而不匀，年总量约为100~400 mm，绝大部分地区蒸发量远高于降水量。年平均气温由东北向西南增加。夏季受东南风的影响，很容易形成炎热多雨的气候。但在冬季，受西伯利亚—蒙古高压的影响，该地区的气候再次变干变冷[16]，是冬旱发生的重点区域。

1.2 数据来源

本研究以1980—2021年ERA5-Land数据集的冬半年降水和温度数据为基础，构建SPEI指数，量化内蒙古地区冬旱的严重程度。这些数据来自欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，ECMWF）发布的高精度、高解析度的ERA5-Land气象再分析数据集（https://cds.climate.copernicus.eu/）。数据的空间分辨率为0.1°，时间分辨率为1个月时间尺度（月平均数据）。



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2019)1822号,对底图边界无修改。下同。

图1　研究区地理概况

Fig. 1　Geographical overview map of the study area

该数据集温度单位为开尔文,转换为摄氏度需减去273.15。此外,已有研究通过使用尔逊积矩相关系数、均方根误差、相对误差等检验方法,证实了ERA5-Land数据集在内蒙古地区的温度、降水和土壤湿度等方面有较好的适用性[17-19]。基于这些数据,通过Matlab软件计算得到近40 a内蒙古地区月和季节时间尺度的标准化降水蒸散指数(SPEI)。

植被类型数据来自于内蒙古自治区1:1000000植被类型图,数字化后对其进行栅格化处理,进而获取的内蒙古植被类型栅格数据[20]。

1.3　研究方法

1.3.1　标准化蒸散指数　标准化蒸散指数(SPEI)是用于评估特定时期内降水量与蒸发量差异的概率指标,适合于干旱和半干旱地区不同时间尺度上的干旱监测与评估[21]。这一指数由Vicente-Serrano等[22]提出,能够综合考虑干旱的强度和持续时间,从而衡量干旱的严重程度。SPEI支持1~48个月的多种时间尺度分析,并可用于多空间的比较。本研究将冬季定义为北半球的10月—翌年3月,即冬半年[23],并采用了两种不同时间尺度的SPEI(1个月和6个月时间尺度)。1个月时间尺度可较为细致的揭示冬旱的细微变化,即月尺度。6个月时间尺度可更直观反应冬旱的整体态势,并以3月的SPEI-6值代表整个冬季干旱状况,即季节尺度。SPEI数值越低,表明地区干旱程度越严重;数值越高,则表示地区干旱程度较轻或无干旱情况。依据国家气象干旱标准(GB/T20481-2017),SPEI被划分为五个等级(表1)[24]。

表1　标准化蒸散指数干旱等级划分

Tab. 1　Standardized evapotranspiration index drought rating

等级	SPEI	类型
1	-0.5<SPEI	无旱
2	-1.0<SPEI≤-0.5	轻旱
3	-1.5<SPEI≤-1.0	中旱
4	-2.0<SPEI≤-1.5	重旱
5	SPEI≤-2.0	特旱

1.3.2　一元线性趋势分析　采用一元线性趋势分析方法[25]从长时间序列栅格数据中提取1980—2021年冬半年平均SPEI数值,进行线性趋势分析,并计算相关性。从整体区域及五种植被类型区展开讨论,计算公式如下:

$$y = a + bx \tag{1}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)^2} \tag{2}$$

式中：y为某一地区的SPEI；x为时间段；a为截距；b为回归系数。R^2表示相关性；y_i为SPEI观测值；$\bar{y}_i$为SPEI平均值；$\hat{y}_i$为SPEI预测值。

1.3.3 时空热点分析 通过时空热点分析对1980—2021年冬旱事件严重程度进行变化模式的分析。该方法在使用二维空间表达地理对象的传统方法基础上，增加了一维时间轴，用于表达地理实体或现象随着时间的变化，时空立方体由时间片组成条柱，条柱时间序列组成立方体，x、y表示空间位置，t为时间(图2)。本研究中的冬旱时空立方体模型采用二维坐标轴来表示冬季干旱发生的平面位置，再加一维纵向的时间轴表示平面位置上冬旱严重程度随时间的变化，从而构建一个由平面空间和时间轴组成的时空融合冬旱立方体。通过统计各时空立方体中包含的冬旱严重程度，将表征冬旱强度的SPEI指标值聚合到每个空间网格的时空条柱中。这样则可运用时间维的几何特性来表达研究区内空间上的冬季干旱事件随时间的变化过程。

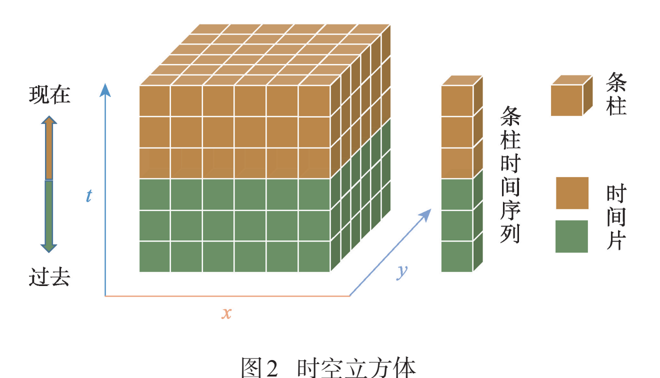


图2 时空立方体

Fig. 2 Space-time cube

利用ArcGIS Pro软件提供的时空立方体创建工具，将SPEI值聚合到时空条柱中，众多的时空条柱组成一个三维的时空立方体，使用网络公用数据格式(Network Common Data Format，NetCDF)存储。利用时空立方体模型将时空关系纳入到空间热点分析中，探测时空中存在的热点和冷点。本文中热点代表冬旱程度呈加重趋势，冷点代表冬旱程度呈减轻的趋势。基于时间序列分析的方法评估这些热点和冷点随时间的变化趋势，分辨出新增、连续、加强、持续、逐渐减少、分散、振荡、历史以及未检测到的模式等不同变化趋势的热点或冷点共16种模式[26]。时空热点分析使用Getis-Ord统计探测要素空间分布的热点和冷点，检测热点或冷点的时间序列变化趋势是否显著则是基于Mann-Kendall趋势分析法来实现。

1.3.4 频率、频数统计 冬旱发生程度与发生等级的空间分布情况，采用冬旱频率与次高频数作为表征冬旱的变化特征的指标。某一等级冬旱频率与不同等级冬旱频率均采用该计算公式如下：

$$H_i = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (3)$$

式中：H_i代表冬旱频率；m代表发生冬旱年数；M代表时间序列总年数。

频数取值工具利用逐个像元计算输入冬旱等级栅格数据值的出现次数，排定等级顺序，设定常量为次高频数，即在输入冬旱等级栅格数据中标识出第二高出现频率的像元(因最高频数统计为无旱，无明显空间差异)。可更详细的展现出发生冬旱各等级在逐像元位置的空间分布状况。频数取值算法如图3。

2 结果与分析

2.1 冬旱时间变化特征

从季尺度分析(表2)，近40 a来，内蒙古整体及其五种主要植被类型区域的冬季SPEI绝大部分显示出下降趋势，表明该地区冬旱严重程度增加。具体来看，每年整体区域的SPEI值以0.02的速度下降($P<0.01$)，波动范围在-1.15~0.94。不同植被类型区域中，内蒙古东部主要分布的森林、草甸和典型草原地区的SPEI值均以低于0.02的速度下降，而每年内蒙古西部地区的戈壁荒漠和荒漠草原SPEI值均以0.0245的速度下降。这些数据表明，近40 a来内蒙古地区西部植被类型的冬季干旱加剧情况相较于东部更为严重。这可能与“气候变化导致降水分配不均，从而出现干的地方越干，湿的地方越湿的局面”这一理论解释相符合[27-28]。

相比于季节尺度，不同地区月尺度下的SPEI呈现出一定的地区差异性。具体来看：每年10月内蒙古整体区域SPEI值以0.0052($P>0.05$)的速度呈现下降趋势。五种植被类型中，除戈壁荒漠呈现不显著的上升趋势，其他植被类型均以不同速率呈现下降趋势，其中典型草原下降速率最大，为0.0073($P>0.05$)。每年11月整体区域SPEI值以0.0060($P>0.05$)的速度呈现下降趋势。五种植被类型中，森林、草甸草原处于下降趋势；典型草原、戈壁荒漠、

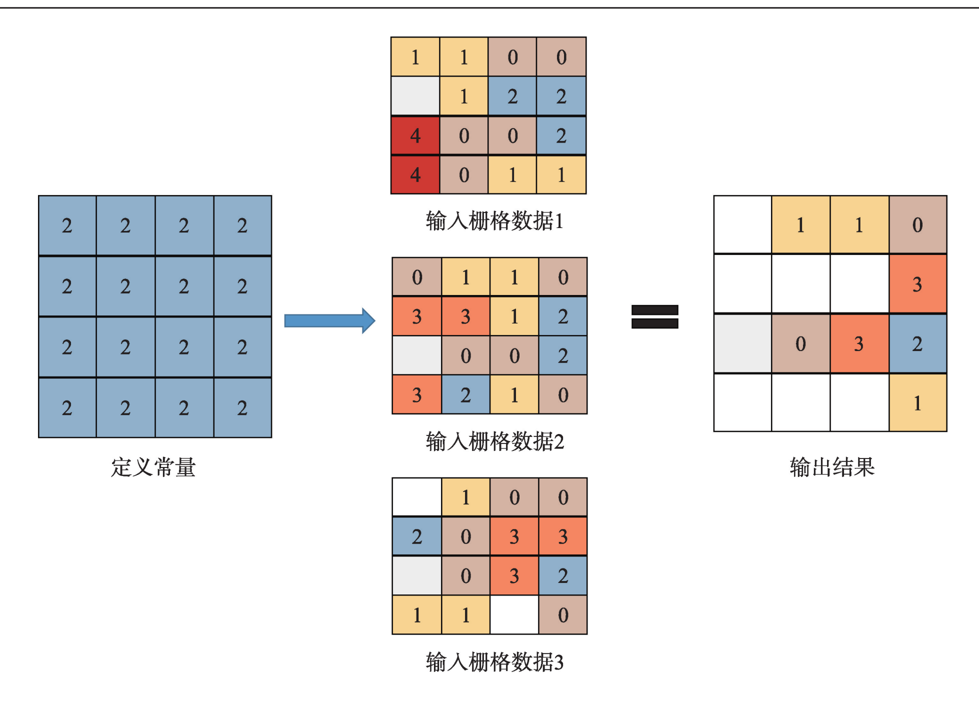


图3　频数取值概念图

Fig. 3　Conceptyual diagram of frequency values

表2　SPEI一元线性时间变化趋势及其相关系数(R^2)和显著性检验(P)

Tab. 2　Single variable linear time variation trend of SPEI, its correlation coefficient (R^2), and significance test (P)

类型		时间尺度						
		季	10月	11月	12月	1月	2月	3月
整体区域	变化趋势	−0.0200	−0.0052	−0.0060	−0.0125	−0.0115	−0.0101	−0.0247
	R^2	0.2032**	0.0012	0.0002	0.0682	0.0761	0.059	0.3122**
森林	变化趋势	−0.0176	−0.0061	−0.0163	−0.0115	−0.0146	0.0061	−0.0136
	R^2	0.0807	0.0099	0.0744	0.0319	0.0505	0.0107	0.0496
草甸草原	变化趋势	−0.0178	−0.0070	−0.0078	−0.0116	−0.0142	−0.0034	−0.0187
	R^2	0.1113*	0.016	0.025	0.0443	0.0737	0.0045	0.1483*
典型草原	变化趋势	−0.0182	−0.0073	0.0013	−0.0121	−0.0139	−0.0128	−0.0262
	R^2	0.1122*	0.0177	0.0005	0.053	0.0761	0.0641	0.2473**
荒漠草原	变化趋势	−0.0245	−0.0045	0.0057	−0.0156	−0.0098	−0.0143	−0.0315
	R^2	0.1628**	0.0049	0.0078	0.0648	0.0247	0.0569	0.2389**
戈壁荒漠	变化趋势	−0.0245	0.0012	0.0079	−0.0125	−0.0031	−0.0190	−0.0293
	R^2	0.1223*	0.0003	0.0114	0.0334	0.0022	0.1074*	0.1706**

注:*表示在0.05的显著性水平上通过检验($P<0.05$),**表示在0.01的显著性水平通过检验($P<0.01$)。

荒漠草原呈现上升趋势,这些趋势均不显著。每年12月整体区域与五种植被类型SPEI值均呈下降趋势,其荒漠草原下降速率最大,为0.0156($P>0.05$)。翌年1月变化情形同12月相似,整体区域和五种植被类型均呈现下降趋势,而森林下降速率最大,为0.0146($P>0.05$)。翌年2月,除森林区域呈现上升趋势外,其他植被类型和整体区域均呈现下降趋势,其中戈壁荒漠下降速率最大,为0.0190($P>0.05$)。翌年3月,整体区域和五种植被类型均呈现下降趋势,其中荒漠草原下降速率最大,为0.0315($P>0.01$)。

2.2　冬旱空间变化模式

通过运用新兴的时空热点分析工具,探究了内蒙古近40 a冬季SPEI的变化模式,主要为振荡的热点、振荡的冷点模式,振荡即反映了冬旱发生时间上的无规律性,热点则表示冬旱程度呈现出加重趋势,冷点则相反。季尺度结果显示(图4),冬旱振荡

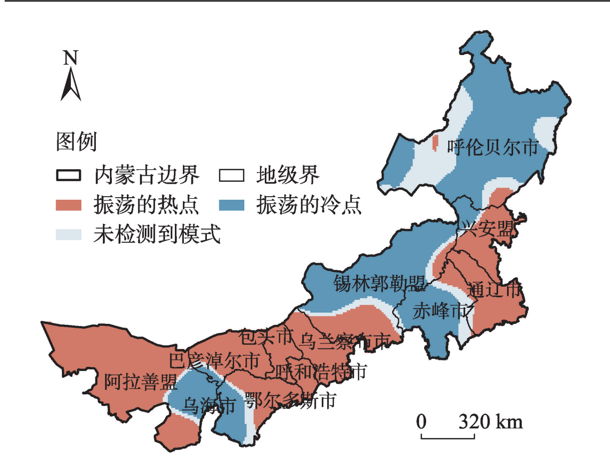


图4 1980—2021年内蒙古地区冬旱季尺度热点分布

Fig. 4 Hot spot distribution map at the winter and dry season scale in Inner Mongolia from 1980-2021

的热点主要集中在内蒙古中西部以及东部的兴安盟和通辽地区，表明这些区域发生冬旱的强度有所加剧，且这一趋势在时间上呈现出无规律的间断性。乌海市周边形成的月牙形区域、锡林郭勒盟、赤峰市和呼伦贝尔市的大部分地区则被识别为振荡的冷点区域，表明这些区域的冬旱强度有所减轻，且同样显示出发生的时间具有不规律性。

月尺度SPEI分析揭示了内蒙古地区近40 a冬季干旱时空变换模式主要为振荡的热点、振荡的冷点模式(图5)。振荡的热点区域表示冬旱严重程度呈现加重的趋势而在时间上没有规律性；振荡的冷点区域则表示冬旱严重程度呈现减轻的趋势，时间上是不规则的。具体来看，每年10月，内蒙古南部

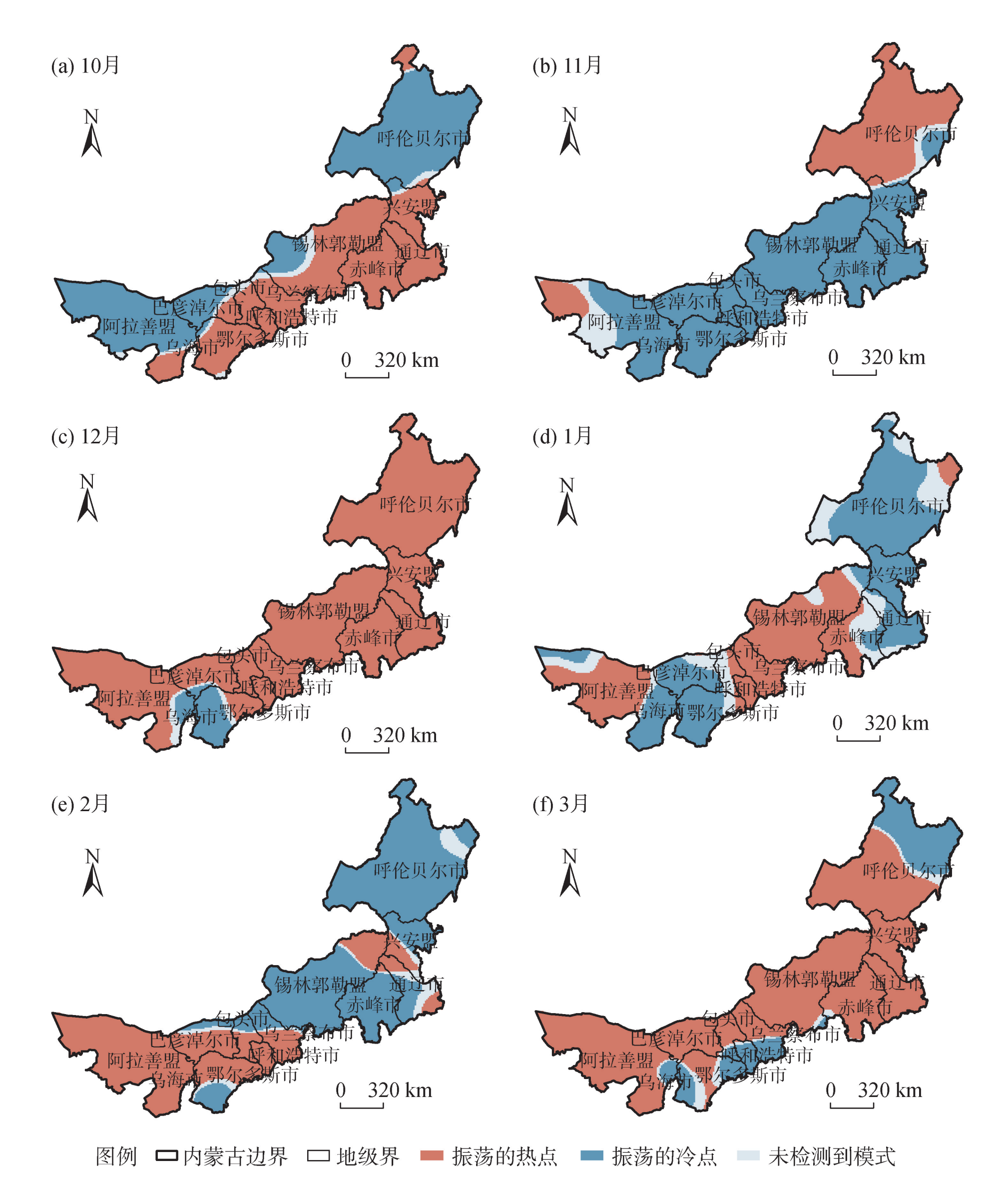


图5 1980—2021年内蒙古地区冬旱月尺度热点分布

Fig. 5 Monthly scale distribution map of winter drought hotspots in Inner Mongolia from 1980-2021

及呼伦贝尔市根河地区主要是振荡的热点区域,而东西两端和锡林郭勒盟西北部则为振荡的冷点区域。11月时,大部分地区呈现为振荡的热点,仅阿拉善盟和呼伦贝尔市西北部为振荡的冷点。12月,绝大部分区域是振荡的热点,只有以乌海市为中心的半月牙状区域为振荡的冷点。翌年1月,冷热点分布在东西方向上交替出现。翌年2月,振荡的热点主要集中在西部及锡林郭勒盟东北部的叶片状区域。翌年3月,呼伦贝尔市东北部以及以乌海市、呼和浩特市为中心的区域形成了月牙状冷点区域,其他地区则为振荡的热点。在这些冷热点的边界区域,通常存在不规则形状的未检测到模式,这些区域清晰地分隔了冷热点区域。这些发现有助于更好地理解和应对内蒙古地区的冬旱情况。

2.3 冬旱发生频率特征

通过对内蒙古冬旱频率的统计分析,结果表明:从季尺度分析(图6),内蒙古整体区域及各植被类型发生无旱频率高达70%以上,且各个地区发生的干旱事件的强度以轻度为主,中度干旱发生在除戈壁荒漠外,其他植被类型区域,其中森林、草甸草原、典型草原、荒漠草原发生中旱的频率相似,各为5%。除此之外,五种植被类型地区均有发生重度干旱事件,其中戈壁荒漠发生频率最高。

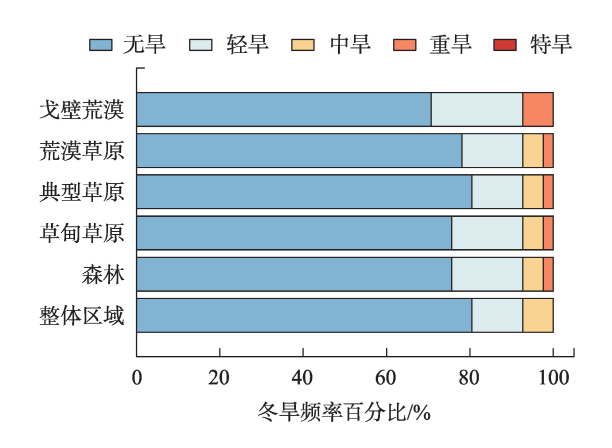


图6　1980—2021年内蒙古地区冬旱季尺度频率统计

Fig. 6　Frequency statistics of winter and dry seasons in Inner Mongolia from 1980-2021

为进一步了解冬季干旱发生的特征细节,从月尺度分析(图7),10月戈壁荒漠发生轻旱频率最高,除典型草原发生中旱的频率最低外,各地区中度干旱发生频率相似,重度干旱在除荒漠草原外的其他区域均有发生,特级冬旱事件仅出现在荒漠草原与戈壁荒漠地区。11月轻度干旱在各个地区发生次数的差异较大,其中荒漠草原发生最为频繁(29%);相对于其他植被类型地区,中度干旱在森林中发生最为频繁(12%);特级冬旱事件仅在戈壁荒漠有发生。而内蒙古地区在翌年1月并未发生重度干旱事件。12月—翌年2月的时间里,内蒙古整体和各植被类型区只发生了轻度、中度和重度冬旱事件,轻度和中度冬旱依旧在戈壁荒漠地区更为常见。翌年3月,在轻度和中度干旱依然存在的同时,荒漠草原和戈壁荒漠地区开始出现重度冬季干旱事件。

2.4 冬旱发生频数特征

通过从不同地区统计发生不同等级冬旱的频率百分比发现,冬季干旱在内蒙古地区发生的频繁程度存在着地区差异性,我们利用局域分析频数取值工具,以不同等级的冬旱事件为单位进行逐像元的频数特征统计并在空间上进行展示(图8~图9)。为了更直观的表征冬旱发生时不同严重程度在逐像元的分布情况,我们选择忽略无旱情形,将频数取值常量定义为次高频数。从季和月尺度来看,内蒙古地区发生轻度干旱的频数最大,中度冬旱次之,重度和特级冬旱仅在内蒙古西部的荒漠草原和戈壁荒漠地区的个别月份发生。从空间上看,大部分区域都在发生着轻度冬旱事件,发生中度冬旱的面积从10月—翌年3月呈现递增趋势,重旱主要出现在内蒙古的中部和东部,特旱主要发生在西部地区。

3 讨论

本文以具有典型干旱半干旱特征的内蒙古为研究区,选择气象再分析数据ERA5-Land,利用标准化降水蒸散指数(SPEI),从多个时间尺度、多植被类型角度出发,刻画了内蒙古冬旱近40 a时空演变特征与变化趋势。结果为冬旱的监测及预警提供参考。我们发现,在季节尺度下的内蒙古整体和各植被类型干旱事件强度均呈现出加重趋势,这一结果与已有研究较为一致,例如,杨舒畅等[29]基于SPI指数对内蒙古地区年尺度和季节尺度干旱发生频率、影响范围和作用强度的时空变化特征进行分析,发现内蒙古地区的冬季干旱强度在近40 a的干旱整体呈加重趋势,且在2000年后增加趋势更为明显。从植被类型上来看,在季节尺度上个别植被类

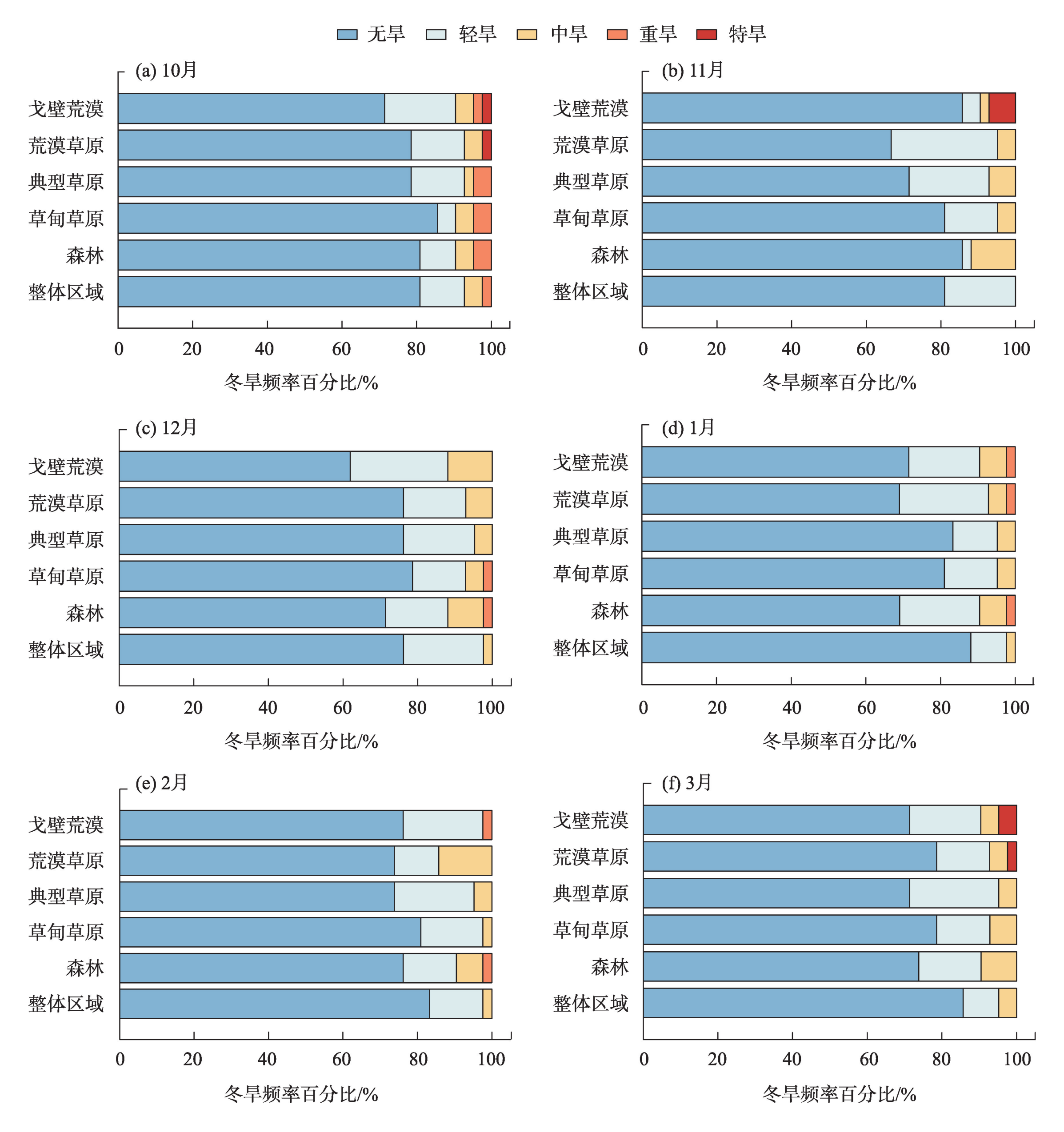


图7 1980—2021年内蒙古地区冬旱月尺度频率统计

Fig. 7 Monthly frequency statistics of winter drought in Inner Mongolia from 1980−2021

型有不明显向湿润变化的趋势[30]。尤其是荒漠草原在五种植被类型中下降趋势最为显著,一方面是因为荒漠草原地区常年受强风影响,风蚀作用导致土壤结构破坏。同时随着表层土壤的丢失,地面的自然覆盖(如草本植物)减少,这进一步加剧了土壤侵蚀,损坏土壤的水分保持能力,形成恶性循环;另一方面人类活动如过度放牧、土地开发等导致荒漠化加剧,降低土壤的水分保持能力,从而使得荒漠草原区域更容易受到冬旱的影响[31-33]。特别要指出的是,在翌年二月,相比于其他植被类型地区,森林最早出现干旱强度降低的情况,这可能是因为这一时期地表温度升高,积雪开始融化,土壤湿度增加,相对于其他植被地区,森林的根系结构能够增加土壤的孔隙率,减少水分的蒸发,从而提高土壤的保水能力,更有助于防止水土流失,这一特征在干旱时期尤为重要[34]。从时空热点分析结果上看,不论是季节尺度还是月尺度,内蒙古西部地区是振荡热点分布最多次数的区域,这说明内蒙古西部地区发生干旱加剧的情形更为频繁,谢岷等[35]通过内蒙古气象数据进行研究指出,内蒙古西部水分盈亏气候倾向率增加,说明该地区干旱呈增加趋势。通过冬旱事件对内蒙古整体区域和五种植被类型的特征

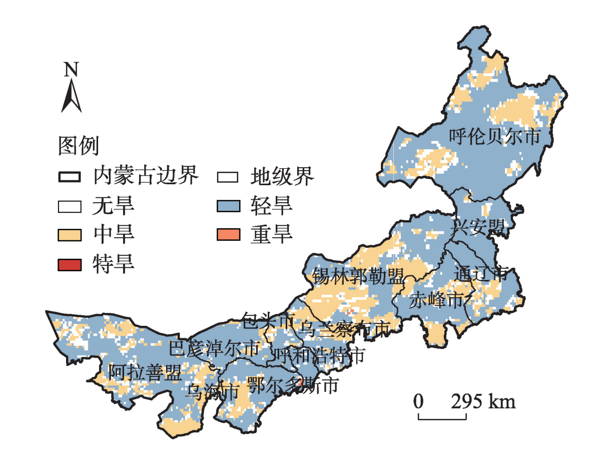


图8 1980—2021年内蒙古地区冬旱次高频数季尺度空间分布

Fig. 8 Seasonal scale spatial distribution map of winter drought sub high frequency in Inner Mongolia from 1980-2021

指标量化描述，发现整体SPEI呈不明显下降趋势；从植被类型来看，在冬半年各月份个别植被类型有不明显向湿润变化的趋势。

总的来说，基于SPEI指数评估内蒙古地区冬旱演变特征，对指导该区域抗旱减灾，保护绿水青山和天然大牧场具有现实意义。根据不同时间尺度、不同区域所发生的热点模式等信息，应对于重点地区采取有效措施进行保护。但本研究也存在一定的局限性，如仅采用再分析气象数据识别冬旱进行时空演变分析，而单一数据源会对结果产生不确定性，日后的工作中应考虑多源数据融合，挖掘更多有效特征信息。未来在干旱监测指标的构建方面，对于蒸散和降水角度的量化，可以进一步考虑更为准确的思路和手段，以上也是我们未来研究工作的主要方面。

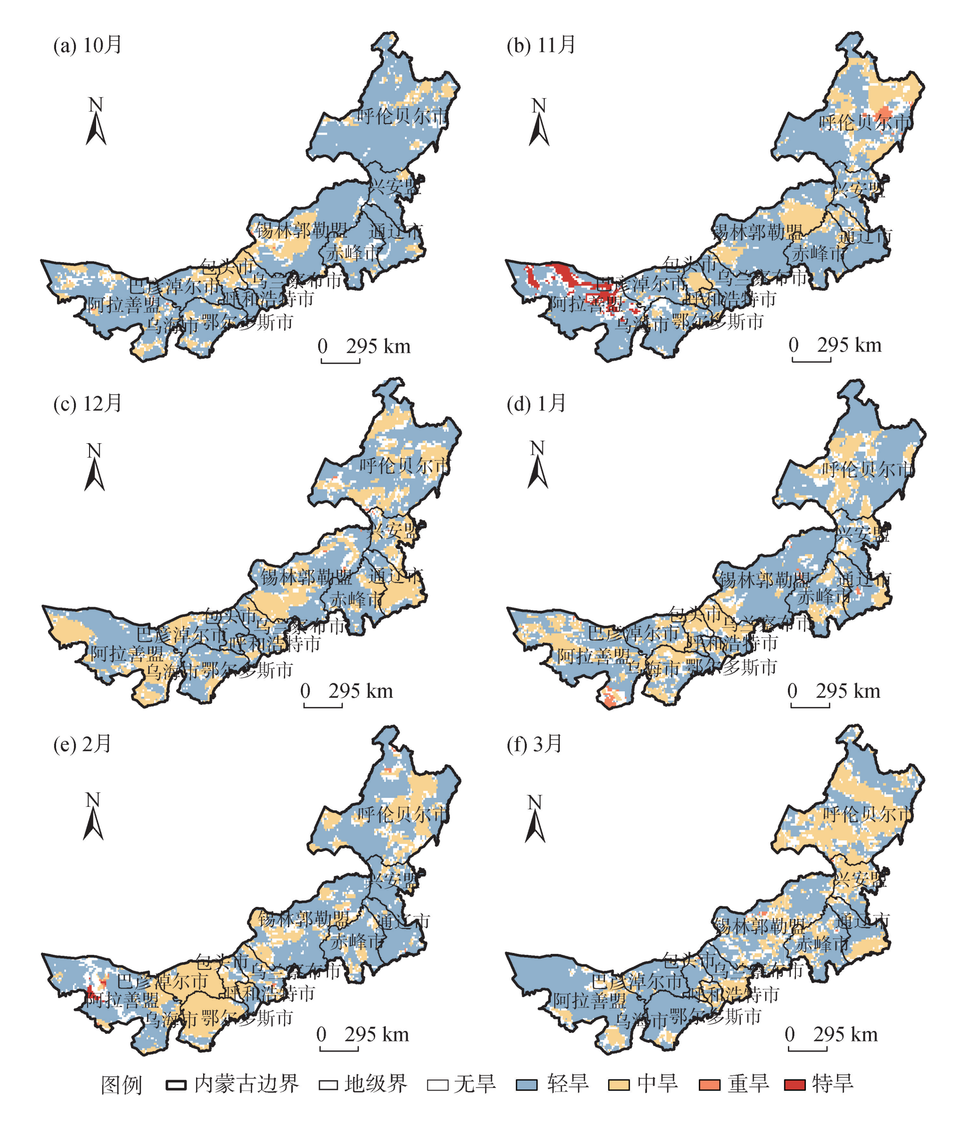


图9 1980—2021年内蒙古地区冬旱次高频数月尺度空间分布

Fig. 9 Monthly spatial distribution map of winter drought sub high frequency in Inner Mongolia from 1980-2021

4 结 论

基于ERA5-Land气象再分析数据集,对近40 a内蒙古地区冬旱时空演变进行分析,探讨了内蒙古在不同时间尺度SPEI指数下冬季干旱的特征和规律。主要得出如下结论:

(1) 时间变化特征方面,不同植被类型和整体区域的SPEI普遍呈现下降趋势,尤其是在早春时期。从植被类型上看,内蒙古西部呈现出相对于东部地区更严重的冬旱情形。

(2) 空间变化模式方面,内蒙古地区冬季干旱严重程度增加的地区面积大于减轻的地区,其中每年12月干旱严重程度增加的地区面积最大,而内蒙古中西部是冬旱最常发生的热点区域。

(3) 在干旱发生频率和频数方面,内蒙古整体区域及各植被类型发生的干旱事件的强度以轻度为主。中重度冬旱事件主要发生在内蒙古西部的荒漠草原和戈壁荒漠地区。月尺度上看,冬半年开始和结束月份发生重度和特度干旱事件的频率更高。

参考文献(References):

[1] Liu J G, Chen H, Tian Z, et al. Interpretation of IPCC AR6: Climate change and water security[J]. Climate Change Research, 2022, 18(4): 405-413.

[2] Zhao D, Zhang Z, Zhang Y, et al. Soil moisture dominates the forest productivity decline during the 2022 China compound drought-heatwave event[J]. Geophysical Research Letters, 2023, 50(17): e2023GL104539.

[3] Wang J S, Han L Y, Jia J Y, et al. The spatial distribution characteristics of a comprehensive drought risk index in southwestern China and underlying causes[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 124(3-4): 517-528.

[4] 包玉龙, 来全, 丽娜, 等. 基于MOD10A1的草原黑灾监测方法研究[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 54-58. [Bao Yulong, Lai Quan, Li Na, et al. Research on the monitoring method of grassland black disaster based on MOD10A1[J]. Journal of Disasters, 2017, 32(2): 54-58.]

[5] Merabti A, Darouich H, Paredes P, et al. Assessing spatial variability and trends of droughts in eastern algeria using SPI, RDI, PDSI, and MedPDSI—A novel drought index using the FAO56 evapotranspiration method[J]. Water, 2023, 15(4): 626.

[6] Yang B, Kong L, Lai C G, et al. A framework on analyzing long-term drought changes and its influential factors based on the PDSI [J]. Atmosphere, 2022, 13(7): 1151.

[7] Ling M H, Han H B, Hu X Y, et al. Drought characteristics and causes during summer maize growth period on Huang-Huai-Hai Plain based on daily scale SPEI[J]. Agricultural Water Management, 2023, 280(30): 108198.

[8] 赵晓萌, 雷田旺, 范婧儿, 等. 基于气象干旱综合监测指数(MCI)的陕西省干旱灾害风险评估与区划[J]. 中国沙漠, 2022, 42(6): 125-133. [Zhao Xiaomeng, Lei Tianwang, Fan Jinger, et al. Risk assessment and regionalization of drought disasters in different seasons in Shanxi, China based on MCI[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(6): 125-133.]

[9] 单璐璐, 董海涛, 谭丽静, 等. K干旱指数在干旱监测中的应用[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(25): 193-195, 198. [Shan Lulu, Dong Haitao, Tan Lijing, et al. Application of K drought monitoring [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(25): 193-195, 198.]

[10] 陈正发, 李靖, 相彪, 等. 基于SPI的云南省多尺度干旱时空演变特征识别[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(4): 92-99. [Chen Zhengfa, Li Jing, Xiang Biao, et al. Identification of spatio-temporal evolution characteristics of multi-scale drought in Yunnan Province based on SPI[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(4): 92-99.]

[11] 段莹, 王文, 蔡晓军. PDSI、SPEI及CI指数在2010/2011年冬、春季江淮流域干旱过程的应用分析[J]. 高原气象, 2013, 32(4): 1126-1139. [Duan Ying, Wang Wen, Cai Xiaojun. Application analysis of PDSI, SPEI, and CI indices in the drought process of the Yangtze-Huaihe River basin in winter/spring of 2010/2011[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(4): 1126-1139.]

[12] 周小东, 常顺利, 王冠正, 等. 天山北坡中段雪岭云杉径向生长对气候变化的响应[J]. 干旱区研究, 2023, 40(8): 1215-1228. [Zhou Xiaodong, Chang Shunli, Wang Guanzheng, et al. Radial growth response of *Picea schrenkiana* to climate change in the middle section of the northern slope of the Tianshan Mountains[J]. Journal of Ecology, 2023, 40(8): 1215-1228.]

[13] 王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 423-431. [Wang Lin, Chen Wen. Analysis of the applicability of the standardized precipitation evapotranspiration index for drought monitoring in China[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2): 423-431.]

[14] 郭海瑛, 王胜, 王娟, 等. 陇东半干旱地区冬季积温变化特征及其对冬小麦的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(20): 101-105. [Guo Haiying, Wang Sheng, Wang Juan, et al. Characteristics of winter temperature accumulation in semi-arid areas of eastern Gansu and its impact on winter wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(20): 101-105.]

[15] 张棋, 许德合, 丁严. 基于SPEI和时空立方体的中国近40年干旱时空模式挖掘[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 194-201. [Zhang Qi, Xu Dehe, Ding Yan. Mining of spatio-temporal patterns of drought in China over the past 40 years based on SPEI and spatio-temporal cube[J]. Agricultural Research in the Arid Ar-

eas, 2021, 39(3): 194−201.]

[16] Wang Y F, Liu G X, Guo E L. Spatial distribution and temporal variation of drought in Inner Mongolia during 1901−2014 using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. Science of Total Environment, 2019, 654(1): 850−862.

[17] 马雪晴. 基于大气再分析数据的内蒙古半干旱草原植被物候预测研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2022. [Ma Xueqing. Research on the Prediction of Vegetation Phenology in the Semi-Arid Grasslands of Inner Mongolia Based on Atmospheric Reanalysis Data[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Geosciences, 2022.]

[18] Liu Y, Yang Y. Detecting a declining trend of multidepth soil moisture over the mongolian plateau from 1950 to 2020 Using ERA5-Land reanalysis datasets[J]. IEEE Access, 2022, 10: 95509−95526.

[19] Xie W, Yi S, Leng C, et al. The evaluation of IMERG and ERA5-Land daily precipitation over China with considering the influence of gauge data bias[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 8085.

[20] Guo E L, Wang Y F, Wang C L, et al. NDVI indicates long-term dynamics of vegetation and its driving forces from climatic and anthropogenic factors in Mongolian Plateau[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4): 688.

[21] 乌日娜, 刘步云, 包玉海. 干旱对中国北方草原总初级生产力影响的时滞和累积效应[J]. 干旱区研究, 2023, 40(10): 1644−1660. [Wu Rina, Liu Buyun, Bao Yuhai. Time lag and cumulative effects of drought on the total primary productivity of grasslands in northern China[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(10): 1644−1660.]

[22] Vicente-Serrano S M, McVicar T R, Miralles D G, et al. Unraveling the influence of atmospheric evaporative demand on drought and its response to climate change[J]. WIREs Climate Change, 2020, 11(2): e632.

[23] 金燕, 晏红明, 张茂松, 等. 云南冬半年极端低温事件与大气环流的关系[J]. 高原气象, 2022, 41(5): 1302−1314. [Jin Yan, Yan Hongming, Zhang Maosong, et al. Relationship between extreme low temperature events and atmospheric circulation in Yunnan during winter half year[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(5): 1302−1314.]

[24] 中华人民共和国国家标准: 气象干旱等级(GB/T 20481−2017)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Standard of the People's Republic of China: Grades of Meteorological Drough t(GB/T 20481−2017) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]

[25] Kang Y, Guo E L, Wang Y F, et al. Characterisation of compound dry and hot events in Inner Mongolia and their relationship with large-scale circulation patterns[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128296.

[26] 昙娜, 阿拉腾图娅, 包玉龙, 等. 基于时空立方体的蒙古高原草原火高频区时空演变特征[J]. 草业科学, 2023, 40(11): 2763−2774. [Tan Na, A latengtuya, Bao Yulong, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of high-frequency grassland fire area in Mongolian Plateau based on a space-time cube[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(11): 2763−2774.]

[27] Zhang Y, Zhang Y J, Cheng L, et al. Have China's drylands become wetting in the past 50 years? [J]. Journal of Geographical Sciences, 2023, 33(1): 99−124.

[28] Feng H H, Zhang M Y. Global land moisture trends: Drier in dry and wetter in wet over land[J]. Science Report, 2016, 5: 18018.

[29] 杨舒畅, 杨恒山. 1982—2013年内蒙古地区干旱变化及植被响应[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(1): 175−183. [Yang Shuchang, Yang Hengshan. Drought evolution and vegetation response in Inner Mongolia from 1982 to 2013[J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(1): 175−183.]

[30] 岳亚朋, 李建国, 潘霞, 等. 中国植被活动变化的主导因素[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2023, 41(1): 50−55. [Yue Yapeng, Li Jianguo, Pan Xia, et al. Identifying dominant factor driving vegetation activity in China[J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2023, 41(1): 50−55.]

[31] Yu D S, Li Y H, Yin B L, et al. Spatiotemporal variation of net primary productivity and its response to drought in Inner Mongolian desert steppe[J]. Global Ecology and Conservation, 2022, 33: e01991.

[32] Chang Y W, Zhang R Q, Hai C X, et al. Seasonal variation in soil temperature and moisture of a desert steppe environment: A case study from Xilamuren, Inner Mongolia[J]. Environmental Earth Science, 2021, 80: 290.

[33] Chen J, Zhang B, Zhou J, et al. Temporal and spatial changes of drought characteristics in temperate steppes in China from 1960 to 2020[J]. Sustainability, 2023, 15(17): 12909.

[34] An Q, He H X, Nie Q W, et al. Spatial and temporal variations of drought in Inner Mongolia, China[J]. Water, 2020, 12(6): 1715.

[35] 谢岷, 高聚林, 孙继颖, 等. 基于SPEI指数的内蒙古多时空尺度干旱特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 140−146. [Xie Min, Gao Julin, Sun Jiying, et al. Analysis of multi-temporal and spatial scale drought characteristics in Inner Mongolia based on SPEI index[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 140−146.]

Characteristics of the spatial and temporal evolution of winter drought in Inner Mongolia over the past 40 years

TAO Jifeng[1,2], BAO Yulong[1,2], GUO Enliang[1,3], Jin Eerdemutu[1,2], Husile[1,2], BAO Yuhai[1,2]

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information Systems, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 3. Inner Mongolia Key Laboratory of Disaster and Ecological Security on the Mongolian Plateau, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China)

Abstract: Winter drought is a main factor hindering winter livestock production in Inner Mongolia. Thus, quantitative characterization of its spatiotemporal changes and development patterns is of great significance for disaster prevention and reduction and for ensuring the healthy development of agriculture and animal husbandry. Using ERA5-Land reanalysis meteorological data from the winter of 1980 to 2021 (October to March of the following year), the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) was calculated at monthly and semi-annual scales. Trend analysis, spatiotemporal hotspot analysis, and other methods were used to analyze the winter drought evolution characteristics of the entire Inner Mongolia region and the five main vegetation types. Results show that in the past 40 years, the overall SPEI in Inner Mongolia has shown an increasing trend in winter, and aridification varies among different vegetation and months, with a few vegetation and months tending toward humidification. The change patterns in Inner Mongolia mainly include three types: oscillating hot spots, oscillating cold spots, and undetected patterns. From a seasonal perspective, hotspots are primarily distributed in most areas of western Inner Mongolia, as well as in Xing'an League and Tongliao City in the east. On a monthly scale, hotspots often appear in the central and western regions of Inner Mongolia. With regard to drought frequency and frequency statistics, mild drought events have the highest frequency, whereas winter drought events occur more frequently and seriously in desert grasslands and neighboring desert areas.

Keywords: winter drought in Inner Mongolia; spatio-temporal evolution; SPEI index; emerging spatio-temporal hotspot analysis